

ESTUDO EXPERIMENTAL DA SUSCETIBILIDADE À CORROSÃO DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO RECICLADAS

CRISTINA FRAZÃO^{1*}, JOAQUIM BARROS², JOSÉ A. BOGAS³, KYPROS PILAKOUTAS⁴

1: ISE, Universidade do Minho
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
frazao_cristina@hotmail.com, www.ise.net

2: ISE, Universidade do Minho
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
barros@civil.uminho.pt, www.ise.net

3: ICIST, Instituto Superior Técnico
Campus da Alameda, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
abogas@civil.ist.utl.pt, www.ceris.pt

4: Dep. de Eng.ª Civil, Universidade de Sheffield
Sheffield S1 3JD, Reino Unido
k.pilakoutas@sheffield.ac.uk, www.sheffield.ac.uk

Palavras-chave: Fibras de aço recicladas, BRFAR, corrosão, detritos de borracha, tração por compressão diametral.

Resumo *As fibras de aço provenientes da indústria da reciclagem de pneus possuem elevada potencialidade no reforço efetivo do betão, especialmente ao nível do seu comportamento à tração e resistência ao impacto. Neste sentido, o betão reforçado com fibras de aço recicladas (BRFAR) constitui uma solução ambientalmente mais sustentável na produção de blocos de elevada eficiência e durabilidade para a construção de quebra-mares para proteção costeira.*

Em ambiente marítimo, a possibilidade de corrosão induzida por cloretos das fibras de aço recicladas é um dos principais mecanismos de deterioração do BRFAR que requer especial atenção. No entanto, a investigação neste domínio ainda é escassa contribuindo para uma filosofia conservadora de utilização do BRFAR que compromete a sua competitividade económica.

Com o intuito de avaliar a suscetibilidade à corrosão do BRFAR, no presente trabalho desenvolveu-se um programa experimental de caracterização da resistência à corrosão das fibras de aço recicladas por intermédio de técnicas eletroquímicas. A influência da corrosão no comportamento pós-fendilhação do BRFAR foi avaliada através de ensaios de tração por compressão diametral realizados em provetes previamente sujeitos a corrosão, por exposição a um ambiente agressivo de cloretos. As fibras recicladas utilizadas neste trabalho possuem pequenos detritos de borracha aderidos à sua superfície. Utilizando dois métodos distintos de remoção destes detritos foi avaliada a influência quer dos métodos aplicados, como da presença dos detritos na resistência das fibras à corrosão.

Os resultados revelaram uma ligeira diminuição da resistência pós-fendilhação nos provetes de BRFAR submetidos a imersão de cloretos. Verificou-se ainda que os detritos de borracha aderidos à superfície das fibras recicladas tiveram um efeito desprezável na resistência à corrosão do BRFAR.

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade é uma preocupação para a indústria da construção civil, visto que esta é responsável pelo elevado consumo de recursos naturais e produção de resíduos sólidos urbanos com impacto ambiental.

Os danos ambientais causados pela deposição indiscriminada de grandes quantidades de resíduos de pneus em aterros aumentaram ao longo dos últimos anos, podendo constituir um grave problema ambiental caso não seja devidamente e atempadamente tratado [1, 2]. Na sequência da implementação de várias diretivas da União Europeia, o uso de materiais derivados da reciclagem de pneus usados tornou-se a estratégia mais sustentável para viabilizar os investimentos na reciclagem de pneus usados [1-3]. Com este objetivo, os processos de degradação mecânica e térmica, como a trituração de pneus, a pirólise e a redução criogénica, são atualmente utilizados pela indústria de reciclagem de pneus [2, 3].

As fibras de aço recicladas (FAR) provenientes da indústria de reciclagem de pneus podem ser utilizadas como reforço efetivo do betão para aplicações estruturais e não estruturais, com elevados benefícios económicos e ambientais [1-4]. Na literatura existente verifica-se que o reforço de materiais de base cimentícia com FAR pode diminuir significativamente o comportamento frágil destes, melhorando a sua resistência pós-fendilhação [5-9]. As FAR também são usadas no betão para restringir a abertura de fendas, com benefícios em termos de durabilidade do betão [9-12].

Em ambientes com ataque de cloretos, um aspeto importante da durabilidade de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) é a resistência à corrosão [13-15]. À semelhança do que sucede nas armaduras ordinárias para betão armado, em ambiente de elevada alcalinidade ($\text{pH} > 13.5$), as fibras de aço são protegidas pela formação de um filme de óxidos protetor na sua superfície, que as passiva [16]. Neste caso, devido à sua elevada razão área de superfície/volume, as fibras de aço são melhor protegidas pelo ambiente alcalino proporcionado pelo betão do que as armaduras ordinárias [16]. Em parte por este motivo, mesmo em ambientes de elevadas concentrações de iões cloreto, foi verificado que apenas as fibras de aço próximas da superfície de betão foram suscetíveis de corrosão [15].

Os processos de corrosão das fibras de aço têm sido objeto de estudo nos últimos anos [14-22], sendo considerado que a corrosão no BRFA tende a ser menos gravosa do que a corrosão das armaduras ordinárias do betão armado [15]. No entanto, os estudos realizados não são ainda suficientes para se compreender os efeitos da corrosão na durabilidade do betão reforçado com fibras de aço recicladas (BRFAR). Deste modo, o principal objetivo do presente trabalho experimental consiste em investigar a suscetibilidade à corrosão das FAR e avaliar o seu efeito no comportamento pós-fendilhação do BRFAR previamente sujeito a ataque de cloretos.

A suscetibilidade à corrosão das FAR foi analisada com recurso a ensaios eletroquímicos e a microscopia eletrónica de varrimento (MEV).

Para avaliar a influência da corrosão no comportamento pós-fendilhação do BRFAR, foram realizados ensaios de tração por compressão diametral, tendo por base um novo método de ensaio [23] que resultou da combinação da metodologia proposta por di Prisco *et al.* [24] para avaliação indireta das propriedades de fratura em modo I do BRF (DEWST, do Inglês: *Double Edge Wedge Splitting test*) e do ensaio de tração por compressão diametral (MSTT, do Inglês: *Modified Splitting Tensile Test*) proposto por um grupo de investigadores da Universidade do Minho [25]. A metodologia adotada e os resultados experimentais obtidos são apresentados e discutidos.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Fibras de aço recicladas

As fibras de aço recicladas (FAR) utilizadas neste estudo foram obtidas por um processo de trituração de pneus de camiões usados. O aço foi separado da borracha por processo magnético. No entanto, a

maioria das FAR contém uma pequena percentagem de detritos de borracha aderidos à sua superfície que não foram removidos durante o processo de reciclagem dos pneus. Estas FAR possuem geometria irregular com diferentes comprimentos e diâmetros (Figura 1). De acordo com as indicações do fornecedor, em média, as FAR possuem 20 mm de comprimento e 0.15 mm de diâmetro, para uma esbelteza de 166. A uma resistência à tração das FAR é superior a 2850 MPa.



Figura 1 – Fibras de aço recicladas: (a) vista geral de várias fibras
(b) Exemplo de uma fibra

Foram considerados dois métodos diferentes para remover os pequenos detritos de borracha aderidos na superfície das FAR: polimento manual da superfície da fibra; pré-tratamento das fibras submetendo-as a elevadas temperaturas. A temperatura de decomposição dos resíduos de borracha foi estabelecida a partir de uma análise termogravimétrica, em que a perda de massa das FAR foi monitorizada até 700°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Verificou-se que submeter as fibras a 350°C durante uma hora é suficiente para eliminar a maioria dos detritos de borracha da superfície das FAR (Figura 2). Deste modo, no presente trabalho optou-se por considerar as seguintes três classes de FAR: Classe 1 – Referência (conforme fornecidas, sem pré-tratamento); Classe 2 – FAR pré-tratadas a 350°C, Classe 3 – FAR polidas.

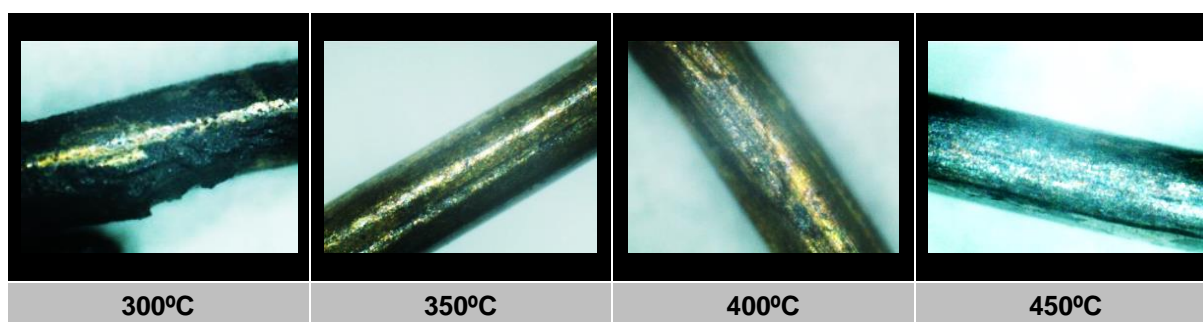


Figura 2 – Imagens das FAR após submeter às temperaturas indicadas durante 1 hora

2.2. Caracterização da corrosão das FAR utilizando técnicas de monitorização eletroquímica

As técnicas eletroquímicas podem ser utilizadas na avaliação, no controlo e na investigação da corrosão de fibras de aço sujeitas a corrosão por ataque de iões cloreto [26]. No presente trabalho, a resistência à corrosão das fibras de aço recicladas foi avaliada através de ensaios de potencial em circuito aberto, E_{OCP} (OCP, do Inglês: *Open Circuit Potential*) e técnicas de polarização linear.

Para realização destes ensaios, foi preparada uma célula eletroquímica constituída pela fibra a ser testada, colocada parcialmente imersa (1/2 do seu comprimento) numa solução de 3.5% NaCl. A concentração de NaCl foi definida de modo a simular condições reais de exposição marítima. No entanto a exposição direta das fibras a estas condições de agressividade ambiental só representa as fibras dispostas nas faces dos elementos de BRFA. Foi ainda utilizado um eletrodo saturado de calomelano (SCE, do Inglês: Saturated Calomel Electrode) como referência, um eletrodo auxiliar de platina de elevada resistência à corrosão e um Potenciostato/Galvanostato (Voltalab, Radiometer Analytical PGZ100) controlado pelo software VoltaMaster-4 [27], para efetuar a monitorização eletroquímica.

Nos ensaios de polarização linear, após os períodos de 30 minutos e 7 dias de imersão das fibras na solução de 3.5% NaCl, registaram-se os valores de E_{OCP} e procedeu-se a um varrimento contínuo e ascendente do potencial com uma amplitude ± 30 mV do valor de E_{OCP} , a uma velocidade de 0.1 mV/s (polarização linear).

Finalizados os ensaios eletroquímicos, algumas das fibras ensaiadas foram analisadas através de microscopia eletrónica de varrimento (MEV), permitindo caracterizar a superfície corroída das fibras. Estas observações foram realizadas num Microscópio Eletrónico de Varrimento de ultra alta resolução com emissão de campo (FEI Nova 200 (FEG/SEM); EDAX - Pegasus X4M (EDS/EBSD)), com sistema integrado de microanálise por raios-X (EDS - *energy dispersive spectrometer*) e análise de padrões de difração de eletrões retrodifundidos (EBSD - *electron backscatter diffraction*).

2.3. Comportamento pós-fendilhação do BRFA sujeito à ação da corrosão

2.3.1 Composição do BRFA e produção dos provetes

O BRFA foi produzido com cimento Portland CEM I 42.5R (C), fíler calcário (FC), três tipos de agregados (areia fina 0.15-1.19 mm (AF), meia areia 0.30-4.76 mm (MA) e brita 12.5-19 mm (B)), água (A), superplastificante ViscoCrete 3005 (SP) e 60 kg/m³ de FAR. Na Tabela 1 apresenta-se a dosagem de cada componente por m³ de betão, que foi definida de modo a garantir características de auto-compactabilidade.

Tabela 1. Composição do BRFA (kg/m³)

C (kg)	FC (kg)	AF (kg)	MA (kg)	B (kg)	A (L)	SP (L)	A/C	FAR (kg)
381	353	237	710	590	140	7.8	0.37	60

Para cada uma das três classes em estudo de FAR (2.1) foram moldados dois provetes cilíndricos, com dimensões de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. De cada um destes provetes cilíndricos obtiveram-se, por corte, quatro discos de 150 mm de diâmetro e 60 mm de espessura, conforme apresentado na Figura 4.

Após 28 dias de cura em água, 4 discos de cada classe de FAR foram imersos durante 10 dias numa solução de 3.5% NaCl de modo a induzir corrosão nas fibras. Para efeito de comparação, os restantes 4 provetes foram apenas curados continuamente em água até à idade de ensaio (Referência).

Um entalhe foi executado em cada face do disco, com profundidade de 5 mm, e paralelo à direção de aplicação da força, de modo a induzir a superfície de fratura ao longo do plano do entalhe (Entalhe 2 da Figura 3). De acordo com o procedimento adotado por Prisco *et al.* [24], um entalhe em forma de "V" com inclinação de 45° foi também executado nas extremidades do plano do entalhe 2, conforme se observa na Figura 3 (Entalhe 1). O objetivo do entalhe 1 consistiu em induzir um campo de tensões capaz de proporcionar a ocorrência de fratura em modo I quase puro no plano de entalhe.

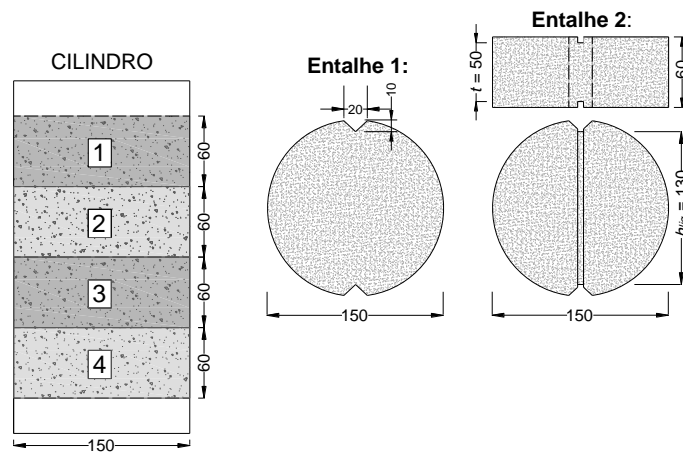


Figura 3. Corte dos discos $\phi 150 \times 60$ mm e configuração dos respetivos entalhes implementados em cada disco (unidades em mm)

2.3.2 Ensaio de tração por compressão diametral

Os ensaios de tração por compressão diametral foram realizados sob controlo de deslocamento através de um transdutor externo (LVDT) posicionado no atuador, de modo a monitorizar a deformação vertical do provete. Foram adotadas as seguintes velocidades de deformação: $1.0 \mu\text{m/s}$ até ao deslocamento de 2.0 mm; $2.0 \mu\text{m/s}$ de 2.0 mm a 3.0 mm; $4.0 \mu\text{m/s}$ até ao fim do ensaio. Para o registo preciso de deteção e propagação da fissura, cinco LVDTs foram utilizados para medir a abertura de fissura ao longo do plano de fratura (Figura 4) – três na face frontal e dois na face oposta do provete. A força foi registada através de uma célula de carga de 150 kN.

O procedimento de ensaio foi definido com base na combinação do DEWST e do MSTT, de modo a tentar superar as limitações de cada um destes métodos de ensaio, desviando as tensões de compressão transversais da seção de fratura [23].

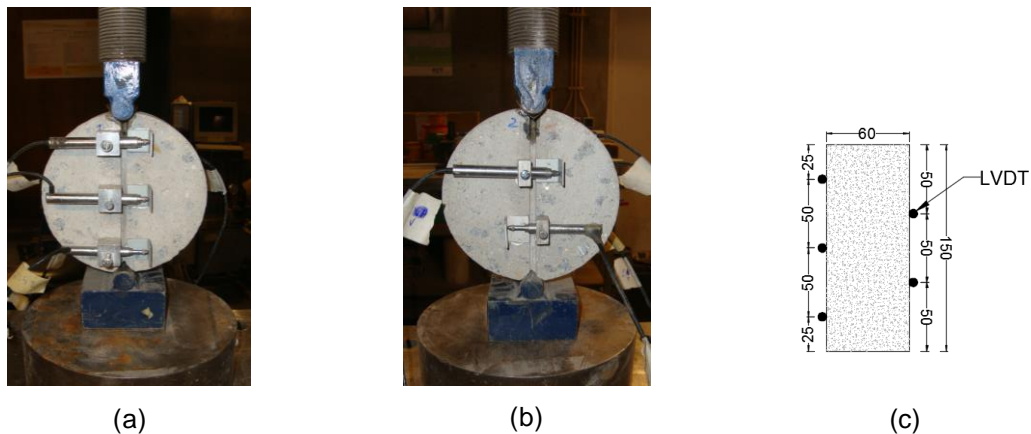


Figura 4. Configuração do ensaio de tração por compressão diametral (a) Vista frontal; (b) Vista traseira; (e) Vista lateral (unidades em mm)

3. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1. Caracterização da corrosão das FAR por ensaios eletroquímicos

Na Tabela 2 apresentam-se os valores médios do i_{corr} e do R_p obtidos nos ensaios de polarização linear.

Tabela 2. Resultados obtidos nos ensaios de polarização linear

			$E_{(i=0)}$ (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_p ($\text{k}\Omega/\text{cm}^2$)	Mass loss (%)	Corrosion rate (mpy)
30 minutos	Classe 1 (Referência)	Média	-525.4 ± 5.2	8.679 ± 1.764	0.609 ± 0.030	1.63	4.009 ± 0.815
		CoV (%)	0.99	20.33	4.98	60.25	20.33
	Classe 2 (T=350°C)	Média	-468.6 ± 13.0	12.937 ± 1.477	0.683 ± 0.153	1.39	5.975 ± 0.682
		CoV (%)	2.77	11.42	22.45	54.20	11.42
	Classe 3 (Polidas)	Média	-493.8 ± 22.5	7.077 ± 1.751	0.778 ± 0.104	0.48	3.268 ± 0.809
		CoV (%)	4.55	24.74	13.43	35.76	24.74
7 dias	Classe 1 (Referência)	Média	-631.1 ± 2.2	8.043 ± 1.969	1.074 ± 0.270	2.93	3.715 ± 0.909
		CoV (%)	0.35	24.48	25.14	28.94	24.48
	Classe 2 (T=350°C)	Média	-605.8 ± 34.3	9.749 ± 1.877	1.381 ± 0.667	3.46	4.905 ± 0.730
		CoV (%)	5.64	19.26	28.33	40.94	14.88
	Classe 3 (Polidas)	Média	-609.1 ± 3.8	11.198 ± 3.298	0.548 ± 0.162	3.63	5.172 ± 1.523
		CoV (%)	0.63	29.45	29.52	40.16	29.45

De acordo com a ASTM C876 [28], os critérios de avaliação das medidas de potencial em armaduras para betão armado, baseado no eléctrodo SCE, indicam que a probabilidade de corrosão é superior a 90% caso o E_{OCP} seja inferior a -276 mV. Admitindo que o mesmo pressuposto é válido para as fibras de aço recicladas, pode-se concluir que face aos resultados obtidos de E_{OCP} , a probabilidade de as FAR corroerem é superior a 90% quando imersas em solução de cloretos.

Para a avaliação dos resultados obtidos da densidade de corrente de corrosão, i_{corr} (velocidade de corrosão), adotando os critérios propostos por Alonso e Andrade [29] e González *et al.* [30], em que para valores maiores que $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a corrosão é ativa, conclui-se que existe elevado risco de corrosão das fibras. Verificou-se que a densidade de corrente de corrosão, i_{corr} , com o tempo de imersão, assim como a resistência à polarização, R_p , variaram de forma pouco significativa do ponto de vista eletroquímico entre as diferentes classes de FAR analisadas.

3.2. Análise microscópica das FAR

Nas Figuras 5 e 6 apresentam-se micrografias da superfície das FAR, com e sem corrosão, recolhidas por MEV.

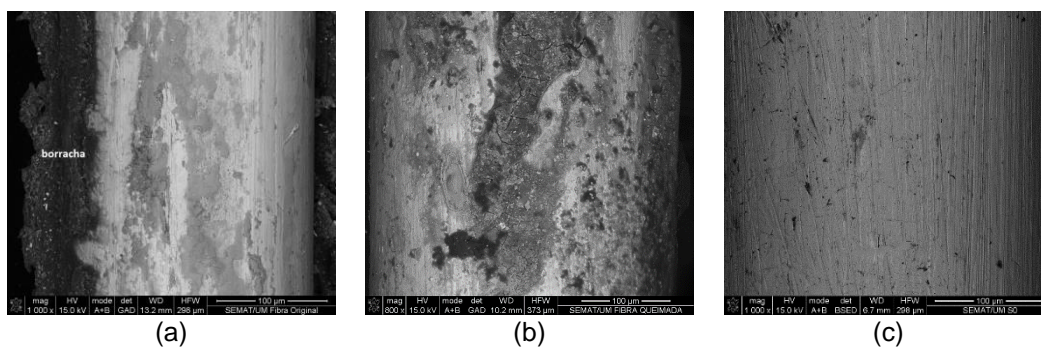


Figura 5. MEV da superfície das FAR
(a) Classe 1 (Referência); (b) Classe 2 ($T=350^{\circ}\text{C}$); (c) Classe 3 (Polidas)

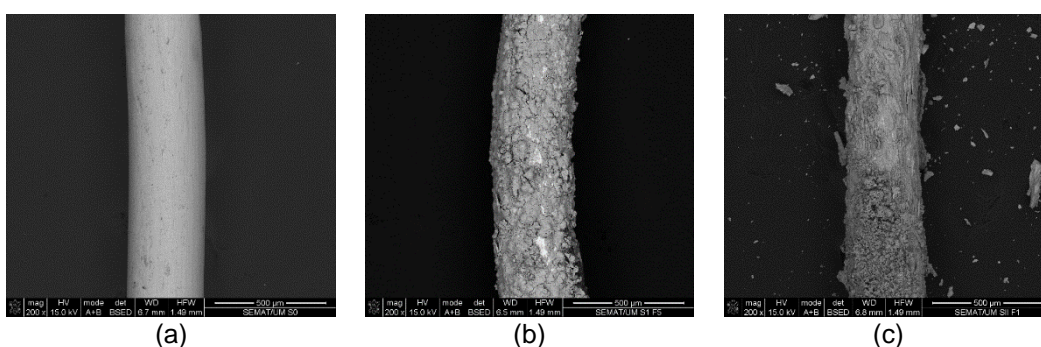


Figura 6. MEV da superfície das FAR (Classe 3)
utilizadas nos ensaios de polarização linear (PL)
(a) Antes PL: sem corrosão; (b) Após PL: com corrosão (30 min. Cl^-);
(c) Após PL: com corrosão (7 dias Cl^-)

Nas Figuras 5c e 6a é possível confirmar a eficácia do polimento na remoção dos detritos de borracha das FAR, obtendo-se uma superfície uniforme. As micrografias apresentadas nas Figuras 6b e 6c revelam que a corrosão das FAR foi generalizada formando um filme homogêneo de óxidos de ferro na sua superfície. Foram também realizadas análises químicas em algumas zonas da superfície das FAR sujeitas a corrosão (Figura 7), tendo-se identificado como principais elementos o carbono, C, o oxigénio, O, e o ferro, Fe, com a composição média apresentada na Tabela 3. Estes elementos são resultado do processo corrosivo, e quando combinados formam elevadas concentrações de óxidos de ferro.

Também foi significativo a presença de elementos como o cobre, Cu, e o Zinco, Zn, que deve estar relacionado com o revestimento aplicado no aço, na produção de pneus, de modo a aumentar a aderência à borracha. Estes elementos foram identificados apenas numa zona da FAR, visto que o polimento das fibras durante o seu processo de limpeza deverá ter removido esse revestimento.

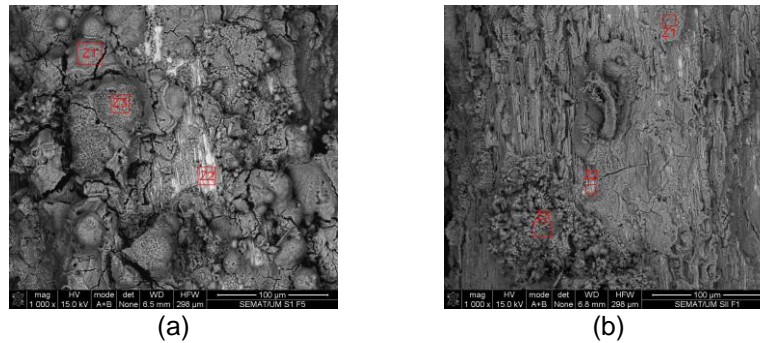


Figura 7. MEV da superfície das FAR corroídas após PL (Classe 3)
(a) 30 min. Cl⁻; (b) 7 dias Cl⁻

Tabela 3. Percentagem atômica dos principais elementos químicos identificados na superfície das FAR após ensaios de polarização linear

	Zona	Percentagem atômica (%)				
		Carbono, C	Ferro, Fe	Oxigénio, O	Cobre, Cu	Zinco, Zn
30 min. Cl ⁻	Z1	22.89	27.18	49.93	-	-
	Z2	19.84	28.59	38.18	8.21	3.78
	Z3	32.61	19.07	47.24	-	-
7 dias Cl ⁻	Z1	8.93	28.18	60.02	-	-
	Z2	12.48	51.91	30.48	-	-
	Z3	24.14	33.50	34.67	-	-

3.3. Ensaios de tração por compressão diametral sob ação da corrosão

Após 10 dias de imersão em solução de 3.5% NaCl, foi possível observar material corroído na solução e pontos de corrosão nas superfícies expostas dos provetes.

Na Figura 8 apresentam-se as curvas médias da resistência à tração por compressão diametral ($\sigma_{t,split}$) versus abertura de fenda, onde $\sigma_{t,split}$ foi determinada por Eq. (1), proposta por Prisco *et al.* [24]. Em que, P é a carga aplicada, t é a espessura e h_{lig} é o comprimento efetivo da seção entalhada que define o plano de fenda (Figura 3). A abertura da fenda corresponde ao valor médio medido pelos cinco LVDTs apresentados na Figura 4.

$$\sigma_{t,split} = \frac{0.89 \cdot P}{t \cdot h_{lig}} \quad (1)$$

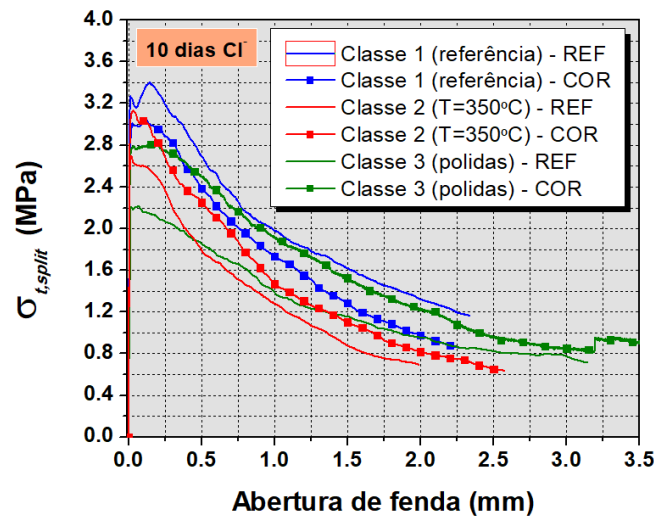


Figura 8. Curvas médias da resistência à tração por compressão diametral versus abertura de fenda obtidas nos provetes com FAR da classe 1, 2 e 3, imersos em água (REF) e imersos em solução de 3.5% NaCl (sob ação da corrosão – COR)

Nos provetes da classe 1 (referência), a ação da corrosão provocou uma ligeira diminuição da tensão média no início da fendilhação (7.9%) e da resistência média à tração pós-fendilhação (10.3%). No entanto, nos provetes da classe 2 e 3, a ação da corrosão provocou um aumento da tensão média no início da fendilhação (16.2% na classe 2 e 26.2% na classe 3) e da resistência média à tração pós-fendilhação (16.2% na classe 2 e 26.4% na classe 3).

As conclusões obtidas pelas curvas médias da resistência à tração por compressão diametral versus abertura de fenda podem ser confirmadas pelos valores das resistências residuais determinadas para uma dada abertura de fenda (σ_w) e da respetiva energia devido à propagação da fenda até uma determinada abertura de fissura w (G_{Fw}), que corresponde à área sob a curva até à abertura de fissura w . Os valores médios obtidos apresentam-se na Tabela 4.

Tabela 4. Máxima resistência à tração, resistências residuais e energia absorvida nos ensaios de tração por compressão diametral

		$\sigma_{máx}$	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{1.5}$	$G_{F0.3}$	$G_{F1.5}$
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[N/mm]	[N/mm]
Classe 1-REF	Avg	3.59	3.08	1.63	0.97	3.59
	CoV (%)	13.77	14.56	26.12	12.34	18.11
Classe 1-COR	Avg	3.19	2.82	1.29	0.88	3.16
	CoV (%)	20.47	33.64	44.78	27.86	38.17
Classe 2-REF	Avg	2.73	2.20	0.88	0.75	2.45
	CoV (%)	15.24	12.54	21.16	14.79	10.97
Classe 2-COR	Avg	3.41	2.56	1.10	0.86	2.91
	CoV (%)	40.89	63.65	74.76	50.61	66.52
Classe 3-REF	Avg	2.28	2.04	1.16	0.64	2.47
	CoV (%)	8.56	8.68	34.15	8.58	16.89
Classe 3-COR	Avg	2.94	2.71	1.51	0.82	3.28
	CoV (%)	24.55	32.74	49.93	27.82	37.77

Os provetes da classe 1 não sujeitos à ação corrosiva foram os que relevaram maior resistência média à tração no início da fendilhação (3.27 MPa) e maior resistência média à tração pós-fendilhação (3.59 MPa), indiciando que os dois métodos utilizados para remover a pequena percentagem de borracha aderida à superfície das fibras provocaram uma diminuição da resistência à tração por compressão diametral dos provetes de BRFR (Figura 9). A corrosão das FAR aparentemente melhorou a resistência à tração por compressão diametral nos provetes da classe 2 e 3. No entanto, no caso dos provetes da classe 1, a resistência à tração por compressão diametral diminuiu ligeiramente após corrosão, o que se justifica pelo menor valor de densidade de corrosão obtido nas FAR da classe 1 nos ensaios de polarização linear após 7 dias de imersão (Tabela 2).

4. CONCLUSÕES

Procedeu-se à caracterização da resistência à corrosão de fibras de aço recicladas (FAR) por intermédio de técnicas eletroquímicas e de análises de microscopia eletrónica de varrimento (MEV). A influência da corrosão das FAR no comportamento pós-fendilhação do betão reforçado com fibras de aço recicladas (BRFR) foi avaliado através de ensaios de tração por compressão diametral. Estes ensaios foram realizados tendo em consideração duas técnicas de remoção dos detritos de borracha da superfície das FAR: polimento manual e pré-tratamento das fibras a 350°C.

Nos ensaios eletroquímicos verificou-se que a probabilidade de corrosão das FAR imersas em solução de 3.5% NaCl é superior a 90%. A corrosão das FAR foi generalizada e uniforme na sua superfície, e os pequenos detritos de borracha tiveram uma influência pouco significativa na resistência à corrosão das fibras. Neste aspeto, conclui-se que os métodos de pré-tratamento utilizados para limpar as fibras poderão ser dispensados.

Após 10 dias de imersão em cloretos, ocorreu uma ligeira diminuição da resistência média à tração pós-fendilhação nos provetes reforçados com as fibras de referência. Todos os provetes de BRFR sujeitos a corrosão apresentaram comportamento pós-fendilhação semelhante, o que significa que a pequena percentagem de borracha das FAR não teve influência significativa na resistência à corrosão do BRFR.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto InOlicTower, PTDC/ECM-EST/2635/2014. Um especial agradecimento à empresa Twincon pelo fornecimento das fibras de aço recicladas e à empresa CiviTest pelo apoio na produção do BRFR. O primeiro autor agradece a bolsa de doutoramento PD/BD/113638/2015 concedida pela FCT.

REFERÊNCIAS

- [1] Pilakoutas, K., Neocleous, K., Tlemat, H., 2004. "Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement", *Proceedings of the ICE: Engineering Sustainability*, 157(3), 131-138.
- [2] Pilakoutas, K., Strube, R., 2001. "Re-use of tyre fibres in concrete", *International Symposium Recycling and Re-use of used tyres*, Dundee, Thomas Telford, 225-236.
- [3] Leone, M., Centonze, G., Colonna, D., Micelli, F., Aiello, M.A., 2016. "Experimental Study on Bond Behavior in Fiber-Reinforced Concrete with Low Content of Recycled Steel Fiber", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, ISSN 0899-1561, 1-13.
- [4] Tlemat, H., Pilakoutas, K., Neocleous, K., 2004. "Demonstrating steel fibres from waste tyres as reinforcement in concrete: material characterization", *Proceedings of the 1st International Conference on Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration*, 7-9 June 2004, Lecce, Italy.
- [5] Zamanzadeh, Z., Lourenço, L.A.P., Barros, J.A.O., 2015. "Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear", *Construction and Building Materials*, 85, 195-207;

- [6] Micelli, F., Leone, M., Centonze, G., Aiello, M., 2014. "Chapter: Go Green: Using Waste and Recycling Materials, Infrastructure Corrosion and Durability Sustainability Study", Edited by Yang Lu, OMICS Group eBooks, USA.
- [7] Centonze, G., Leonard, M., Aiello, M.A., 2012. "Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization", *Construction and Building Materials*, 36, 12-57.
- [8] Aiello, M.A., Leuzzi, F., Centonze, G., Maffezzoli, A., 2009. "Use of steel fibers recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength", *Waste Management*, 29, 1960-1970.
- [9] Tlemat, H., Pilakoutas, K., Neocleous, K., 2005. "Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres", *Material and Structures*, 39, 365-376.
- [10] Tlemat, H., Pilakoutas, K., Neocleous, K., 2003. "Flexural toughness of SFRC made with fibres extracted from tyres", *Recycling and Reuse of Waste Materials, Proceedings of International Symposium on Advances in Waste Management and Recycling*, Dundee, 9-11 September 2003, Pub. Thomas Telford Ltd.
- [11] Neocleous, K., Tlemat, H., Pilakoutas, K., 2006. "Design issues for concrete reinforced with steel fibers, including fibers recovered from used tires", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(5), 677-685.
- [12] Graeff, A., Pilakoutas, K., Lynsdale, C., Neocleous, K., Peres, M., 2012. "Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres", *Engineering Structures*, 45, 385-395.
- [13] ACI 544.5R-10, 2010. "Report on the physical properties and durability of fiber-reinforced concrete", ACI Committee 544.
- [14] Granju, J., Balouch, S., 2005. "Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks", *Cement and Concrete Research*, 35(3), 572-577.
- [15] Balouch, S., Forth, J., Granju, J., 2010. "Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, 17, 410-414.
- [16] Chen, G., Hadi, M.N.S., Gao, D., Zhao, L., 2015. "Experimental study on the properties of corroded steel fibres", *Construction and Building Materials*, 79, 165-172.
- [17] Frazão, C., Camões, A., Barros, J., Gonçalves, D., 2015. "Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 80, 155-166.
- [18] Frazão C., Barros J., Camões, A., Alves, A.C., Rocha, L., 2016. "Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, 79, 112-122.
- [19] Berrocal, C., Lundgren, K., LÖfgren, I., 2013. "Influence of steel fibres on corrosion of reinforcement in concrete in chloride environments: A review ", *Proceedings of International Conference: FC2013-Fiber Concrete 2013*, 12th-13th September 2013, Prague, Czech Republic.
- [20] Sadeghi-Pouya, H., Ganjian, E., Claisse, P., Muthuramalingam, K., 2013. "Corrosion durability of high performance steel fibre reinforced concrete", *Proceedings of 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Japan Concrete Institute, Kyoto, Japan.
- [21] Shi, X., Xie, N., Fortune, K., Gong, J., 2012. "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview ", *Construction and Building Materials*, 30, 125-138.
- [22] Graeff, A., Pilakoutas, K., Lynsdale, C., Neocleous, K., 2009. "Corrosion Durability of Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete ", *Article No.7, Intersections/Intersec_ii*, 6, 4.

- [23] Lameiras, R., Barros, J., Azenha, M., 2015. "Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC)", *Cement & Concrete Composites*, 59, 60-76.
- [24] di Prisco, M., Ferrara, L., Lamperti, M.L., 2013. "Double edge wedge splitting (DEWS): an indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites", *Materials and Structures*, 46 (11), 1893–1918.
- [25] Abrishambaf. A., Barros, J.A.O., Cunha, V.M.C.F., 2015. "Tensile stress–crack width law for steel fibre reinforced self-compacting concrete obtained from indirect (splitting) tensile tests", *Cement & Concrete Composites*, 57, 153-165.
- [26] Wolyneć, S., 2003. "Técnicas Eletroquímicas em Corrosão", Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, Brasil.
- [27] D21V032, 2013. "VoltaLab systems with VoltaMaster 4", User's Manual (English), HACH LANGE GmbH, Germany.
- [28] ASTM C876-09, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM International, 2009.
- [29] Alonso, C.; Andrade, C., 1990. "Effect of nitride as a corrosion inhibitor in contaminated and chloride-free carbonated mortars", *ACI Materials Journal*, 78, 2, 130-137.
- [30] González, J.; Miranda, J., Feliu, S., 2004. "Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete", *Corrosion Science*, 46, 2467-2485.